

Projet de recherche
« Réduction de la Mortalité Aviaire
dans les Parcs Éoliens en Exploitation »

Les systèmes de détection-réaction dans les parcs éoliens, un moyen de réduction des mortalités aviaires :

Principes et conseils pour une bonne évaluation

Alexandre Corbeau¹ & Aurélien Besnard¹

¹ Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Univ Montpellier, CNRS UMR5175, EPHE-PSL University, IRD, Univ Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France — équipe de recherche du projet MAPE (Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens terrestres en exploitations)

Table des matières

PREFACE.....	3
1. INTRODUCTION	5
2. LES SYSTEMES DE DETECTION-REACTION	10
2.1. PRINCIPES ET FONCTIONNEMENT.....	10
2.1.1. <i>Le fonctionnement</i>	11
2.1.2. <i>La détection</i>	11
2.1.3. <i>La classification</i>	11
2.1.4. <i>La réaction</i>	12
2.2. LES QUATRE GRANDES FAMILLES DE SYSTEMES DE DETECTION-REACTION	12
2.2.1. <i>L'optique 2D</i>	13
2.2.2. <i>L'optique 3D</i>	13
2.2.3. <i>Le radar</i>	13
2.2.4. <i>Une combinaison des technologies</i>	14
2.2.5. <i>Liste des fournisseurs</i>	14
3. L'EVALUATION DES SYSTEMES DE DETECTION-REACTION.....	15
3.1. ATTENTION A LA FIABILITE STATISTIQUE.....	15
3.1.1. <i>La standardisation et la répétabilité des tests</i>	15
3.1.2. <i>La définition des paramètres à estimer</i>	16
3.1.3. <i>La taille de l'échantillon et l'incertitude</i>	17
3.1.4. <i>L'utilisation d'observateurs</i>	18
3.2. LE FONCTIONNEMENT	21
3.3. LA DETECTION	22
3.4. LA CLASSIFICATION.....	25
3.5. LA REACTION	27
4. CONCLUSION	28
5. REMERCIEMENTS	28
6. BIBLIOGRAPHIE	28

Préface

Cette note de synthèse a été rédigée dans le cadre du projet de recherche collaboratif MAPE (<https://mape.cnrs.fr/fr>), un projet qui vise à mieux comprendre les causes et conséquences des mortalités aviaires dans les parcs éoliens terrestres en exploitation, induites par les collisions et ceci dans le but de réduire ces mortalités. Ce projet porte uniquement sur les mortalités aviaires en phase d'exploitation et non sur les impacts lors de la construction du parc et/ou les impacts indirects (voir ci-dessous). Il ne porte pas non plus sur les mortalités de chauve-souris (aussi appelés chiroptères, étudiées dans d'autres projets).

Ce présent document se base sur l'analyse critique des dizaines de publications internationales citées en fin de document, mais aussi de celle des 26 retours d'expériences (majoritairement confidentiels) réalisées à travers le monde (dont 7 en France) et également sur de nombreux échanges ou consultations des différents acteurs de la filière : trois opérateurs éoliens, deux turbiniers, trois bureaux d'études, différentes rencontres avec des chargés de mission de DREAL avec des membres d'instituts tels que l'équipe du muséum d'histoire naturelle qui travaille sur les volets éoliens et chiroptères ou une chargée de mission biodiversité de chez KNE et quatre chargés de recherche de chez France Énergie Marine. Nous avons aussi consulté individuellement les six fournisseurs de système de détection-réaction présents sur le sol français (ou en cours d'installation), pour mieux appréhender leurs technologies et ses contraintes (5 en visioconférence et un par écrit à la date de publication de ce rapport). De plus, les principales informations de ce document ont été présentées et discutées au Comité de pilotage du projet MAPE et lors du séminaire de mars 2021 réunissant les 90 structures partenaires du projet MAPE. Pour finir, ce document a également été relu et commenté par les membres du comité technique du WP4 du projet MAPE : M. Cellier (EDF-RE), J. Champagnon (Tour du Valat), C. Chuzeville (Valeco), G. Dangoisse (Boralex), T. Disca (Sintec-Ing/Biotope), N. Saulnier (LPO 34), M. Thauront (UPGE/Ecosphère) & T. Vasseur (RES).

Par ailleurs, à la date d'écriture de cette note, aucune éolienne *offshore* n'est en activité en France. Ce projet se concentre donc uniquement sur les parcs éoliens terrestres en France. Les problématiques étant similaires et les modèles d'éoliennes étant largement identiques d'un continent à l'autre, les informations et recommandations fournies dans cette note sont applicables à l'ensemble des parcs éoliens à travers le monde. En théorie, les recommandations de ce document sont valables pour les éoliennes *offshores* qui fonctionnent sur les mêmes principes que celles *onshore*. Cependant les éoliennes *offshores* semblent plus difficiles à brider rapidement, car beaucoup plus grandes et plus puissantes et soumises à des vents plus forts.

Enfin, il est important de noter que ce travail porte sur des systèmes de « détection-réaction » qui évoluent rapidement. De nombreuses entreprises se lancent aussi dans ce secteur. Il est donc

possible qu'à l'heure où vous lirez ce texte, d'autres systèmes que ceux listés ci-dessous soient disponibles sur le marché. De même, de nombreux tests sont en cours dans différents pays équipés par ces systèmes. Il est donc probable que de nouvelles informations sur la performance de ces dispositifs soient publiées après la finalisation de cette note. Nous conseillons donc les lecteurs de consulter ces éventuelles nouvelles informations, le cas échéant, pour les mettre en regard de la présente note.

Enfin, nous tenons à préciser qu'une partie des informations décrites dans ce document est issue de retours d'expérience soumis à accords de confidentialité. Du fait de leur importance pour la partie visant à décrire les pratiques courantes, ces éléments sont anonymisés et rapportés sans référence spécifique.

1. Introduction

Dans un contexte de changement climatique global et de lutte contre celui-ci par les gouvernements, l'utilisation des énergies renouvelables est la piste privilégiée pour effectuer une transition énergétique moins consommatrice d'énergies fossiles (<https://www.gouvernement.fr/action/la-transition-energetique-pour-la-croissance-verte>). C'est dans le cadre de cette stratégie que les parcs éoliens, de même que les parcs de panneaux photovoltaïques, sont en plein essor. Leur nombre a fortement augmenté en France ces dernières années. Pour citer quelques chiffres, en 2020, il y avait 8500 éoliennes sur le territoire français produisant 17,5 MW. La loi de Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE 2019-2023) prévoit de doubler cette capacité de production d'ici à 2024. Dans le monde, 651 GW étaient produits par des éoliennes au 1er janvier 2020 avec en tête, la Chine et les États-Unis (Global Wind Energy Council, 2020).

Cependant, cette transition vers les énergies renouvelables, et notamment vers l'éolien, a des conséquences sur l'environnement et particulièrement sur la biodiversité (Katzner et al. 2019). Les oiseaux et les chiroptères (chauve-souris) sont les principaux groupes taxonomiques impactés négativement par ces infrastructures (Román et al. 2020 ; Thaxter et al. 2017). Il est donc nécessaire de comprendre et d'identifier ces impacts afin de les éviter, de les réduire ou de les compenser le mieux possible, en accord avec les réglementations nationale et européenne.

Ces impacts sur la biodiversité, bien décrits dans la littérature scientifique, sont de deux ordres :

En premier lieu, il s'agit d'impacts indirects d'abord par la perte d'habitat lors de la construction de l'éolienne, puis également sur une surface plus importante lors du fonctionnement de ces éoliennes, du fait d'un évitement de la zone de l'infrastructure par les populations résidentes et reproductrices (Powlesland 2009). Par exemple, des études montrent que les chauves-souris présentent une baisse de l'utilisation de l'espace dans les 500 mètres autour des éoliennes en contexte bocager et cet évitement est détectable jusqu'à un kilomètre du mat de l'éolienne (Barré et al. 2018). Cet évitement serait induit par le mouvement et le bruit produits par le rotor. De même, pour les oiseaux, et principalement les passereaux chanteurs, le bruit ambiant et la projection de l'ombre en mouvement sur le sol induisent un fort effet de répulsion avec des effets qui varient probablement entre espèces (Zwart et al. 2016, Marques et al. 2020). D'autres groupes taxonomiques peuvent également être affectés par les parcs éoliens. Il a ainsi été constaté que les vibrations des éoliennes avaient un impact négatif sur l'abondance de la faune du sol sur des distances comprises entre 50 à 200 m selon les groupes taxonomiques (Velilla et al. 2021).

Le deuxième impact décrit dans la littérature est, lui, direct. Il s'agit des mortalités par collision avec l'éolienne (le mât et les pales du rotor) (Barrios & Rodríguez 2004 ; Drewitt & Langston

2006, 2008 ; Powlesland 2009). Les chauves-souris, et certainement les petits passereaux, sont non seulement victimes de la collision directe avec l'éolienne, mais meurent aussi de barotraumatisme. Il s'agit de dépressions créées par le mouvement de la pale qui font imploser les organes internes des animaux lorsqu'ils sont happés par les mouvements de la pale (Rollins et al. 2012). Ces mortalités peuvent avoir des conséquences négatives importantes sur la dynamique des populations impactées (Carrete et al. 2009, Frick 2017).

En France, la seule étude globale disponible estime que 0,3 à 18,3 (7 en moyenne) oiseaux meurent du fait de collisions avec les éoliennes, pour chaque éolienne et chaque année (estimé sur un nombre limité de parc cependant). Cela représente un peu plus d'un oiseau toutes les 10 minutes et près de 60 000 mortalités par an en France (LPO 2017). 81 % des individus concernés par ces mortalités sont des espèces protégées. Aux États-Unis, une synthèse bibliographique de 2013 sur une cinquantaine de parcs estimait une mortalité du même ordre de grandeur que celle observée en France, avec $5,25 \pm 2,10$ collisions par an et par éolienne soit un total annuel de mortalités de 234 000 $\pm 94 000$ oiseaux pour 44 577 éoliennes (Loss 2013). Il est important de noter cependant que très peu d'études permettent d'avoir une bonne estimation de la mortalité induite par les collisions avec les éoliennes, notamment du fait des faibles tailles d'échantillon, de la très grande surface à prospecter pour détecter l'ensemble des cadavres et de la disparition rapide des cadavres notamment de petits animaux (Péron et al. 2013, Bernardino et al. 2018, Dominguez del Valle et al. 2020). Les chiffres annoncés sont donc des sous-estimations des mortalités réelles. Par ailleurs, les conséquences en termes de dynamique des populations de ces mortalités sont variables entre espèces (Drewitt & Langston 2006, Schaub 2012, Bellebaum et al. 2013). Les chiffres globaux ont donc peu d'intérêt (voir la note de synthèse du WP2 du programme de recherche MAPE).

Il faut noter que dans le droit français et européen, il est obligatoire d'éviter, de réduire et/ou de compenser toute destruction d'espèce protégée (séquence ERC, cf. Code de l'environnement français 2021). Dans ce travail, nous nous focaliserons uniquement sur la réduction de l'impact direct des mortalités de l'avifaune. Actuellement, la mise en place de mesures de réduction dans les parcs éoliens en activité est envisagée/exigée lorsque de la mortalité d'espèces protégées est suspectée lors des études d'impact conduites en amont de l'autorisation de la construction des parcs (même si elle n'est pas toujours quantifiée) ou constatée en phase d'exploitation. Les moyens actuellement les plus utilisés pour réduire ces mortalités dans les parcs en exploitation sont (i) le bridage générique/statique au cours d'une période de l'année ou lors de travaux agricoles attirant des oiseaux ou lors de conditions météorologiques particulières (c'est le cas notamment pour les chiroptères, voir par exemple Arnett & May 2016 ; Richardson et al. 2021), ou (ii) l'installation sur les parcs de systèmes de « détection-réaction » qui émettent des signaux dans le but d'effaroucher les oiseaux lorsqu'ils s'approchent du rotor ou brident les éoliennes en temps réel.

Ces systèmes de détection-réaction sont considérés comme un moyen de réduction de la mortalité et non d'évitement. En France, il semble que ces systèmes de réduction ne soient utilisés que pour réduire les mortalités d'espèces dites « patrimoniales », c'est-à-dire principalement les grands planeurs (les rapaces, les cigognes et les grues) et d'autres espèces faisant l'objet d'un Plan National d'Action, et concernées par des collisions (faucon crécerellette, outardes etc.).

Malgré leur mise en place sur certains parcs, des mortalités par collision sont toujours constatées sur certains parcs équipés. Cette persistance des mortalités pose la question de l'efficacité de ces dispositifs à réduire de manière « significative » les mortalités. De fait, aucune étude globale et précise sur les systèmes de détection-réaction n'a été réalisée afin d'évaluer leurs performances et leur efficacité. Ces dispositifs ont cependant fait l'objet de diverses évaluations réalisées par les fournisseurs de système eux-mêmes, par des bureaux d'études mandatés par les opérateurs de certains parcs, mais aussi, dans quelques cas, par des ONGs ou agences gouvernementales (voir par exemple quelques études disponibles publiquement : Evaluation of DTBird Detection Capabilities at Smola Wind-power Plant, Norway. 2012 ; Evaluation of DTBird Detection Capabilities in the WTG Calandawind, Switzerland - Swiss Ornithological Institute in Sempach 2014 ; Evaluation of DTBird System in the WTG Calandawind, Switzerland 2014 ; Pilot Evaluation of DTBirdV4D4 in the USA 2018 ; McClure et al 2018 ; McClure et al 2021). Malgré ces évaluations, il est difficile de tirer des conclusions claires sur l'efficacité de ces dispositifs. En effet, nous avons constaté qu'elles reposent sur une grande diversité de protocoles, qui, par leur hétérogénéité, ne rendent pas possible une étude comparative de l'efficacité de ces systèmes de détection-réaction. De plus, ces tests sont principalement réalisés dans des conditions de détection optimale (y compris dans les études publiées dans des revues internationales, voir par exemple McClure et al 2018), souvent avec de faibles tailles d'échantillons qui ne permettent pas d'apprécier les incertitudes des chiffres avancés (incertitudes qui sont d'ailleurs rarement quantifiées dans les rapports d'étude que nous avons pu consulter) et parfois avec des protocoles qui ne sont pas adaptés (variables mesurées pas en adéquation avec le fonctionnement des systèmes, évaluation uniquement d'une partie des étapes de fonctionnement, répétitions trop peu nombreuses, utilisations de méthodes d'analyses statistiques non adaptées, etc.). Dans un certain nombre de retours d'expérience ou d'études que nous avons pu consulter, les protocoles ayant permis d'évaluer les performances de ces systèmes ne sont souvent pas décrits ou pas décrits avec suffisamment de précision (méthode statistique, taille d'échantillon, incertitudes, répétabilité des mesures, etc.) pour permettre d'apprécier leur robustesse.

Les grands principes et recommandations pour conduire des évaluations robustes des systèmes de détection-réaction fournis dans ce document se concentrent sur les performances des systèmes et non leur efficacité, tout comme la grande majorité des retours d'expérience que nous avons consultés (voir cependant McClure et al. 2021, la seule étude robuste de ce type). Leur efficacité réelle ne peut en effet se mesurer que par l'étude de leur capacité à réduire réellement les mortalités. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une comparaison des mortalités avant et après la mise en place des systèmes et, sur des sites avec installation des systèmes, mais aussi des sites témoins (Before-After Control-Impact, BACI - Smith et al. 1993). Malgré son importance, ce choix n'a pas été décrit ici pour deux raisons principales :

La première est une question éthique. En effet, pour mesurer l'efficacité de ces systèmes, il est nécessaire de comparer les nombres de mortalités avant et après la mise en place du système de détection-réaction et sur des sites témoins. Ceci implique donc de retarder la mise en place de ces systèmes et de laisser se poursuivre des mortalités sur des parcs pendant une longue période sans réduction (trois ans pour l'étude de McClure et al. 2021 par exemple).

La deuxième raison est la faible fiabilité de l'estimation des mortalités. En effet, pour évaluer les différences de mortalités avant et après mise en place de ces systèmes, il faut estimer les mortalités de façon précise. Plusieurs études (Péron et al. 2013 ; Bernardino et al. 2018 ; Kleyheeg-Hartman et al. 2018 ; Dominguez del Valle et al. 2020) ont montré les difficultés à obtenir des estimations précises de ces mortalités du fait de nombreux biais à prendre en compte, tels que la probabilité de détection des cadavres par les observateurs ou le taux de disparition des cadavres par exemple. Le nombre de passages sur le terrain est par ailleurs en général faible ce qui conduit à des nombres de cadavres détectés peu élevés. Enfin les mortalités d'espèces patrimoniales sont souvent des événements ponctuels et peu nombreux. L'ensemble de ces facteurs conduit à des estimations très peu fiables qui rendent particulièrement difficile la mise en évidence d'une différence significative (au sens statistique) des estimations de mortalités avant/après installation des systèmes de détection, même lorsque cette différence existe.

Box 1 - Vers une évaluation de l'efficacité des systèmes de détection-réaction ?

Les vidéos des systèmes de détection-réaction déjà mis en place sur certains parcs peuvent permettre de détecter les mortalités. Leur analyse pourrait donc permettre de quantifier les collisions et éventuellement de quantifier combien semblent avoir été évitées par le système. Néanmoins, se pose, d'une part, la question de l'énorme quantité de données à traiter et d'autre part, la non-exhaustivité des collisions/mortalités détectées. En effet, une partie des mortalités peut être plus facilement analysée si celles-ci interviennent à la suite d'une détection d'oiseau par le système, mais que ce dernier n'a pas réagi de manière assez performante pour l'éviter. Au contraire, la quantification des collisions « manquées » par le système peut être plus fastidieuse. Cependant, l'amélioration des systèmes d'analyse d'image, notamment par intelligence artificielle, offre une perspective intéressante pour conduire de telles évaluations dans le futur.

Enfin, de nouvelles technologies laser de détection de mortalité automatique, telle que B-Finder (Poznań®, Pologne), pourraient permettre de détecter toutes les mortalités (détection des chutes des corps d'oiseaux ou chiroptères) au pied de l'éolienne, mais, vient une nouvelle fois, la question de l'évaluation des performances de telles technologies.

La mise en commun, au niveau national, des données des suivis de mortalité dans DEPOBIO pourra peut-être, elle aussi, permettre d'évaluer l'efficacité de ces dispositifs. Cependant leur forte hétérogénéité et leur évolution rapide risque de limiter cette possibilité.

Dans ce document, après avoir décrit les différentes technologies disponibles actuellement sur le marché et les principes de fonctionnement de ces systèmes de détection-réaction, nous détaillerons l'ensemble des critères qui influence les performances de ces systèmes et de quelle manière les protocoles de tests doivent être construits et appliqués afin de tenir compte de l'ensemble de ces critères d'influences pour estimer les performances des systèmes de détection-réaction de la manière la plus rigoureuse possible.

2. Les systèmes de détection-réaction

Les systèmes de détection-réaction sont en constante évolution et se développent très rapidement. L'amélioration des technologies (caméra de surveillance, matériel informatique pour les puissances de calculs, etc.), mais aussi des algorithmes de traitement des informations, les rendent plus accessibles financièrement et également plus performantes. Afin de tenir compte des futures avancées technologiques des systèmes, et des différences entre les technologies utilisées, nous avons ici défini quatre grandes phases de fonctionnement communes à l'ensemble des quatre grandes familles de systèmes existants. Que cela soit pour les principes et pour les familles de technologie, nous excluons de ce rapport les « sentinelles ornithologiques » humaines qui sont parfois mises en œuvre sur les parcs. À noter cependant que les grands principes énoncés ci-dessous sont directement transférables à ces sentinelles ornithologiques.

2.1. Principes et fonctionnement

Le fonctionnement de systèmes de détection – réaction s'organise autour de quatre grandes étapes :

- **Définition d'une liste d'espèces à protéger.**
Cette étape repose actuellement largement sur des choix sociétaux et, d'après les informations fournies par les DREAL, est définie par des arrêtés préfectoraux en fonction : des enjeux de chaque parc, de la sensibilité des espèces et de leurs tailles (pour qu'elles puissent être détectées par les systèmes). Ces choix ne sont pas réalisés sur des critères purement législatifs (une large majorité des espèces qui font l'objet de collisions avec les éoliennes sont protégées avec des statuts de protection équivalents) ni purement scientifiques (voir la synthèse de l'état de l'art produite dans le cadre du WP2 de MAPE concernant l'impact des mortalités par collision sur la dynamique des populations).
- **Définition d'une sphère à risque.** Cette zone à risque est définie comme la zone dangereuse autour de l'éolienne, dans toutes les directions (sphère avec le rotor comme centre), et est totalement dépendante de la vitesse de déplacement des espèces cibles choisies et des caractéristiques des éoliennes, qui impactent notamment leur temps d'arrêt (voir le WP3 du projet MAPE qui vise à caractériser la distribution des vitesses de vol).
- **Détection/classification par le système des espèces cibles lorsqu'elles sont dans cette sphère à risque.**
- **Réaction du système** (de manière proportionnée et dans un temps imparti) lorsqu'il détecte les espèces cibles pénétrant dans la zone à risque.

Ces quatre étapes se traduisent en quatre grandes phases de fonctionnement des systèmes de détection-réaction sur lesquelles il est nécessaire de baser les évaluations (le fonctionnement, la détection, la classification et la réaction). C'est la bonne mise en œuvre de l'ensemble de ces quatre phases, communes à l'ensemble des technologies utilisées par les différentes familles de systèmes de détection-réaction, qui permet une bonne efficacité des dispositifs dans leur objectif de réduire les mortalités des espèces cibles.

2.1.1. Le fonctionnement

Nous définissons ici le fonctionnement comme la couverture temporelle et la couverture spatiale des systèmes. La couverture temporelle correspond au pourcentage de temps durant lequel le système est opérationnel. Elle peut s'exprimer en pourcentage d'une journée, d'un mois ou d'une année. La couverture spatiale représente, quant à elle, le pourcentage de la zone de la sphère à risque qui est couverte par le système. Elle est fonction des zones aveugles, des angles morts potentiels et de la distance maximale de détection.



2.1.2. La détection

La détection est définie ici comme la « visualisation » par le système d'un objet/cible d'intérêt potentiel. Plusieurs techniques pour détecter les objets considérés comme pertinents sont possibles et diffèrent fortement entre systèmes. Pour le radar, par exemple, ce sont des échos qui sont détectés. Pour les systèmes basés sur des caméras optiques, ces objets seront des pixels sur des images.

2.1.3. La classification

La classification est définie ici comme l'ensemble des étapes de traitements de l'information obtenue sur la cible détectée jusqu'à la prise de décision pour déclencher, ou non, une réaction. Il s'agit donc d'algorithmes informatiques de traitements des informations collectées sur la cible (taille, vitesse, etc.). Ces algorithmes sont de différents types selon les systèmes (programmation simple, intelligence artificielle, etc.).

La détection et la classification sont des étapes qui peuvent être difficiles à distinguer dans l'analyse des systèmes de détection-réaction et qui peuvent être difficiles, voire impossibles à évaluer séparément sur ces systèmes tant elles sont imbriquées. En effet, les systèmes de détection-réaction détectent et classifient continuellement les données collectées afin d'éliminer rapidement tout objet « non-cible ». Les algorithmes de traitement des informations collectées par les technologies utilisées par ces systèmes relèvent par ailleurs généralement du secret industriel. De plus, pour certains types d'algorithmes, notamment ceux basés sur l'intelligence artificielle, il n'est généralement pas possible de déterminer une liste de critères précis ayant conduit à la décision.

2.1.4. La réaction

La réaction est définie ici comme la réponse du système à la suite de la détection et la classification d'une situation à risque. Elle est classiquement de deux types ; elle conduit soit à un effarouchement acoustique avec émission de divers sons (nombreuses possibilités selon la demande des opérateurs en lien avec les espèces ciblées, la présence de voisinage, etc.) soit à un bridage de l'éolienne par un envoi d'ordre d'arrêt au SCADA (automate de gestion de l'éolienne). Certains systèmes combinent ces deux types de réactions. Certains dispositifs (pas encore installés en France) utilisent aussi un effarouchement actif visuel (signaux lumineux).

Enfin, notez que la question de l'efficacité des effarouchements acoustiques ou visuels n'est pas abordée dans ce document. Le but de cette note est de proposer des critères d'évaluation de la bonne réaction des systèmes dans le temps imparti et non de l'efficacité des dispositifs (voir introduction ci-dessus pour la justification de ce choix).

2.2. Les quatre grandes familles de systèmes de détection-réaction

Dans cette partie, nous avons classé l'ensemble des systèmes de détection-réaction connus en quatre grandes familles. Cette classification inclut également des systèmes encore en développement, mais la démocratisation de ces technologies et l'arrivée de nouveaux systèmes rendront rapidement cette liste obsolète. Malgré tout, les principes de ces quatre grandes familles ont été déterminés de façon à classer l'ensemble des systèmes actuels et probablement futurs. Notez également que différents systèmes de détection simple sans réaction (généralement utilisés pour des comptages, des études, etc.) existent, mais ne sont pas listés à cette date tant qu'ils ne sont pas installés sur des parcs éoliens et couplés à un système engendrant une réaction

(effarouchement ou bridage). Comme précisé ci-dessus, nous avons exclu les « sentinelles ornithologiques » qui n'ont jamais été concrètement abordées dans les discussions du projet MAPE.

2.2.1. L'optique 2D

Les systèmes basés sur l'utilisation de l'optique 2D fonctionnent grâce à des caméras optiques. Certains fournisseurs peuvent les coupler à des caméras thermiques, mais cette méthode est très peu utilisée, car onéreuse. Certains fournisseurs complètent aussi leurs caméras optiques par des éclairages infrarouges qui permettent aux systèmes de fonctionner dans l'obscurité.

Sur les systèmes d'optique 2D, les détections et classifications se font par analyse d'image et plus particulièrement de pixels. Le système détecte généralement les changements de contrastes de pixels entre images successives et classe l'objet comme pertinent ou non, généralement en fonction de sa taille et de sa vitesse, grâce à des algorithmes programmés manuellement ou par des algorithmes d'intelligence artificielle (« Machine Learning » ou « Deep Learning »).

2.2.2. L'optique 3D

L'optique 3D fonctionne également avec des systèmes de caméras optiques, mais cette technique permet une évaluation plus précise de la distance entre le système et l'objet en utilisant la trajectométrie. Ceci permet au système de qualifier la direction de la cible et la nécessité de déclencher, ou non, une réaction.

Le seul système actuellement disponible avec cette technologie (Identiflight® USA), identifie aussi les cibles à l'espèce grâce à un algorithme d'intelligence artificielle. Il n'est cependant calibré que pour quelques espèces pour l'instant (pygargue à tête blanche, pygargue à queue blanche, aigle royal ou milan royal) (McClure et al. 2018 & 2021), mais cette liste est susceptible de s'allonger au cours du temps, en corolaire du déploiement de ce système pour d'autres espèces.

2.2.3. Le radar

La technologie radar se démocratise depuis plusieurs années, notamment pour dénombrer et cartographier les trajectoires des oiseaux (Larkin et al. 1979, Diehl et al. 2003). Elle repose sur la réflexion des ondes radar par les objets (oiseaux) rencontrés. C'est l'écho de ces objets que le radar captera et détectera après avoir éliminé les autres échos non-cible. Ces systèmes ont une plus grande portée que l'optique, mais souvent une faible couverture à courte distance (du fait de l'angle réduit alors que les systèmes optiques combinent en général plusieurs caméras, à noter cependant que différents systèmes existent). De plus, le radar ne permet pas la classification à l'espèce.

Cependant, une classification des oiseaux par groupes de taille est possible avec certains modèles (Harmata et al. 1999).

2.2.4. Une combinaison des technologies

La combinaison de différents systèmes de détection se développe, mais n'est pas encore disponible sur le marché à l'heure de la rédaction de cette note. Les systèmes en cours de développement utilisent principalement la combinaison d'un système radar à longue distance avec un système optique à plus courte distance permettant d'allier les avantages de ces deux technologies (distance de détection *versus* identification à l'espèce) tout en palliant leurs limites respectives.

Il existe également un système en cours de développement (EchoTrack® Canada) qui utilise la technologie radar couplée à une surveillance acoustique basée sur un système de microphones qui enregistrent les cris des oiseaux. Cependant cette technologie n'est pas développée en France et nous n'avons pu avoir accès aux premiers tests réalisés.

2.2.5. Liste des fournisseurs

Vous trouverez ci-dessous la liste des fournisseurs de système de détection-réaction actuellement disponible sur le marché en France au premier semestre 2021 (Tableau 1). Ils sont classés par famille de technologie qu'ils utilisent.

Tableau 1 – Liste des fournisseurs de systèmes de détection-réaction disponibles en France en mai 2021.

Famille	Nom du produit	Entreprise (Pays)	Opérationnel	Parcs équipés en France	Autres pays déployés
optique 2D	BirdSentinel / Safe Wind	Biodiv-Wind (France)	oui (plusieurs versions)	43	Europe
optique 2D	DTBird	DT Bird (Espagne)	oui (plusieurs versions)	23	Europe, USA, Asie
optique 2D	Bioseco	BIOSECO (Pologne)	oui	1	Pologne, Allemagne
optique 2D	ProBird	Sens of Life (France)	oui	~50	Europe
optique 2D	BirdRecorder	ZSW (Allemagne)	en développement	0	Allemagne (test)
optique 2D	BirdVision	BirdVision (Allemagne)	en développement	0	Allemagne (test)
optique 2D	Projet de minimisation de prélèvement d'aigle	Université de l'état d'Oregon (USA)	en développement	0	USA (test)
optique 3D	Identiflight	Boulder Imaging (USA)	oui	1	USA, Europe
radar	RobinRadar MAX	Robin Radar System (Pays-Bas)	oui	0	Allemagne + Pays-bas (test)
radar	3DFlightTrack	Diades Marine (France)	oui	2	non
radar	Birdtrack	Strix (Portugal)	oui	0	Portugal
radar	BirdScan MS1	Swiss Birdradar (Suisse)	en développement	0	Allemagne (test)
radar	Multiradar		en développement	0	Allemagne (test)
radar + micro	EchoTrack Radar-Acoustic Surveillance System	EchoTrack (Canada)	en développement	0	Afrique du Sud (test)
radar + vidéo	Laufer Wind	Renewable Energy (USA)	en développement	0	USA (test)
radar + vidéo	MUSE	DHI (Danemark)	en développement	0	Danemark (test)

3. L'évaluation des systèmes de détection-réaction

Dans cette partie, après avoir introduit les notions de statistique qui sont nécessaires pour la bonne conduite de protocoles et l'interprétation des résultats de tests de performances des systèmes, nous avons défini et décrit les paramètres qu'il est important d'estimer pour qualifier/quantifier les performances des systèmes de détection-réaction (section « ce qu'il faut évaluer »). Nous avons par ailleurs listé les facteurs qui peuvent affecter ces paramètres (section « les facteurs d'influences »). Quelques exemples issus des retours d'expérience que nous avons pu consulter nous ont permis d'illustrer la nécessité de tenir compte de l'ensemble de ces paramètres et variables lors de tests sur ces systèmes (section « piste sur le contenu des évaluations »).

3.1. Attention à la fiabilité statistique

3.1.1. La standardisation et la répétabilité des tests

Afin de comparer des études, et donc potentiellement les systèmes entre eux, un protocole commun et standardisé est nécessaire. Cette standardisation est également essentielle lorsque plusieurs parties d'un même test sont couplées pour augmenter la taille de l'échantillon. Dans ces cas-là, le protocole doit être identique pour limiter au maximum les biais existants. KNE (*centre de compétences pour la protection de la nature et la transition écologique*) en Allemagne, a déjà proposé un guide avec les grandes lignes importantes à respecter dans la mise en place d'une étude d'efficacité des systèmes de détection-réaction (KNE 2019). Ces lignes directrices générales manquent cependant d'universalité quant à leur utilisation et de conseils notamment sur la fiabilité statistique et la rigueur des analyses, sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement.

Exemple :

Les sources de biais que nous avons pu observer dans certains retours d'expérience, lorsque les tests sont réalisés sur plusieurs jours, peuvent être des changements dans les observateurs ou dans le matériel utilisé (drone, jumelles, télémètre, etc.). Ces différences peuvent entraîner une hétérogénéité dans la probabilité de détection associée à un observateur ou à un matériel par rapport à un autre. Pour éviter cela, les conditions des tests doivent être les plus identiques (standardisées) possible d'une mesure à l'autre, et réalisées dans les mêmes conditions météorologiques. Dans le cas contraire, il faudra tenir compte de ces variations dans les analyses statistiques.

Ce qui doit être retrouvé dans les protocoles et/ou les résultats des tests :

Dans les tests et les retours d'expérience, il est nécessaire de retrouver les protocoles décrits le plus précisément possible ainsi que la taille de l'échantillon et s'il y a eu des différences/changements entre les observateurs ou le matériel utilisé lors de la réalisation du protocole de test.

3.1.2. La définition des paramètres à estimer

L'évaluation d'une efficacité ou d'une performance implique d'estimer des paramètres (probabilité de détection, distance de détection moyenne, etc.). L'estimation de paramètres implique que les protocoles de terrain s'attachent à mesurer des variables modélisables, c'est-à-dire définies par une valeur mesurée sur une entité clairement définie (appelée unité statistique ou individu statistique). Dans la plupart des tests (ou des études de terrain en général), il y a deux types de variables : la première est la **variable « à expliquer »**. Il s'agit de la variable focale de l'étude qui va être à la base de l'estimation du paramètre quantifiant les performances du système. Il peut s'agir dans le cas des tests des systèmes de détection-réaction de relever si un oiseau (un trajet) a été détecté ou non avant une certaine distance ou la distance de première détection. Nous avons pu constater dans plusieurs retours d'expérience ou protocoles que ces variables sont parfois peu explicites (voir ci-dessous). Leur formalisation est absolument nécessaire puisqu'elles sont à la base des analyses statistiques ultérieures. Les deuxièmes types de variables sont les **variables « explicatives »** qui peuvent influencer la variable à expliquer. Dans le cas d'une variable à expliquer qui serait la probabilité de détection, il s'agit par exemple de la distance, de l'espèce, de la luminosité, etc.

Plusieurs variables explicatives (la distance, l'espèce, les conditions météorologiques, etc.) peuvent être utilisées dans le cas des tests de performance des systèmes de détection-réaction, cependant il n'y aura en général qu'une seule variable à expliquer par question/étape. Par exemple, une première question peut concerner le temps de fonctionnement du système (il s'agit bien d'une variable à expliquer). Une deuxième question peut concerner la probabilité de détection des oiseaux (il s'agit là aussi d'une variable à expliquer).

Exemple :

Dans les retours d'expérience que nous avons pu consulter, la trajectoire d'un oiseau est fréquemment utilisée pour évaluer la performance de l'étape de détection dans les tests de performance des systèmes. Cependant, une trajectoire est une unité trop vague pour être utilisée dans des analyses statistiques pour tester les performances. En revanche, la mesure de plusieurs variables plus précises dérivées de ces trajectoires comme la probabilité que l'objet soit détecté avant une certaine distance, ou la distance moyenne de première détection peuvent être utilisées.

Ce qui doit être retrouvé dans les protocoles et/ou les résultats des tests :

L'ensemble des variables à expliquer (en général une par performance questionnée/évaluée) et des variables « explicatives » doivent être clairement indiquées/définies et quantifiables. Les paramètres à estimer qui en sont dérivés doivent être décrits de la même manière que la méthode d'estimation de ces paramètres (modèle linéaire généralisé par exemple).

3.1.3. La taille de l'échantillon et l'incertitude

L'incertitude sur les paramètres estimés est directement liée à la taille de l'échantillon mesuré (nombre de fois où la variable à expliquer a été mesurée). Il existe de fait une relation mathématique entre la précision d'une estimation et la taille d'échantillon utilisée pour cette estimation. Plus l'échantillon est grand, plus l'incertitude est faible et plus les valeurs des paramètres estimés sont proches de la réalité.

La définition d'une taille d'échantillon pertinente est l'une des principales difficultés dans l'élaboration de protocoles de test, car plus la réponse attendue se veut précise et avec une incertitude faible, plus la taille de l'échantillon doit être grande. Cependant, une grande précision implique une grande pression d'échantillonnage et, de fait, un coût (de terrain) important. Pourtant ce point est crucial, car un échantillon de petite taille même avec des valeurs très tranchées est associé à une grande incertitude et ne permet pas de conclure de façon fiable sur une évaluation des performances.

Notez que la taille d'échantillon doit être suffisante pour chaque variable à évaluer/paramètre à modéliser et un calcul de l'incertitude associée doit être systématiquement rapporté dans les résultats des tests. L'analyse des retours d'expérience que nous avons pu consulter montre que cette incertitude sur l'estimation des paramètres n'est quasiment jamais mentionnée. En l'absence de cette incertitude, les estimations ne sont pas exploitables.

Exemple :

Pour reprendre l'exemple de détection des oiseaux, il faut plusieurs données de détection, pour de mêmes unités statistiques (ex. : section de trajets dans un espace et un temps donnés), pour estimer une probabilité de détection avec une moyenne et une incertitude associées. Lorsque des tests de performance annoncent par exemple 80 % de détection à moins de 150 mètres, il est impossible de savoir avec ce simple chiffre (sans incertitude et taille d'échantillon), si cette estimation est fiable ou non. Il est possible que ce chiffre soit issu d'une étude basée sur la mesure de cinq trajectoires d'oiseaux. Dans cette situation, la statistique nous permet de conclure que la vraie valeur de la probabilité de détection a 95 % de chance de se trouver entre 28,3 et 99,5 % (intervalle de confiance à 95 %). Cette même probabilité de détection moyenne (80 %) peut être issue d'une étude basée sur 500 trajectoires. Dans ce cas, la vraie probabilité de détection a 95 % de chance d'être comprise entre

76,2 et 83,4 % soit une précision plus de dix fois plus grande que celle de l'étude avec une faible taille d'échantillon.

Ce qui doit être retrouvé dans les protocoles et/ou les résultats des tests :

Il est indispensable de préciser la taille de l'échantillon mesuré et l'incertitude des estimations (intervalle de confiance, erreur standard) lorsque des estimations de la variable à expliquer sont annoncées. Cela permet d'évaluer la robustesse des conclusions de l'étude.

3.1.4. L'utilisation d'observateurs

La plupart des retours d'expérience des tests auxquels nous avons eu accès sont des tests qui comparent le nombre de détections/classifications des systèmes de détection-réaction à une détection/classification de référence. La référence utilisée est très majoritairement un observateur humain dans ces retours d'expérience. Or, il est connu que les capacités visuelles de l'homme, en plus de varier d'un individu à l'autre et de varier dans le temps (notamment du fait de la fatigue), diminuent très fortement avec la distance entre l'observateur et l'objet à détecter (Rosenstock et al. 2020). Malgré cela, peu de tests de performance modélisent explicitement ces biais de détection potentiels avec la distance. Pourtant, négliger ces biais du système de référence conduit à une estimation biaisée des taux de détection des systèmes de détection-réaction qui sont évalués.

Exemple :

Dans des tests de performance que nous avons lu, les systèmes de détection-réaction ont généralement un meilleur taux de détection que les observateurs humains. Cependant, la simple comparaison relative des deux processus d'observation n'informe pas sur la détection absolue du système de détection-réaction. Sans modélisation explicite des probabilités de détection, il est impossible d'estimer sans biais les performances absolues des systèmes. Pour illustrer cette situation, prenons une situation où des observateurs ont un taux de détection de 80 % alors que le système de détection-réaction évalué a un taux de 10 % supérieur soit 90 %. Dans cette situation, la comparaison « naïve » des performances du système avec l'observateur conduit à estimer une probabilité de détection de 92 %, soit une légère surestimation du taux de détection réel du système (Tableau 2).

Tableau 2 – Exemple du biais dans l'estimation de la probabilité de détection (90 %) d'un système de détection basé sur une référence, ici humaine, dont la détection n'est pas de 100 % (80 %) sur la base de 100 trajets réels à proximité d'une éolienne. Le tableau bleu reporte les valeurs réelles de performance des observateurs/systèmes de détection et le tableau vert reporte les estimations obtenues par un calcul naïf de la détection par simple comparaison entre observateurs et système de détection-réaction.

100 trajets		Taux de détection	Nombre de trajets détectés
Observateur		0,8	80
Système		0,9	90
Les deux			72
Détecté par le système mais pas par l'observateur			18
Détecté par l'observateur mais pas par le système			8
Nombre de trajets analysés	98		
Taux de détection du système	0,92		
Biais de détection	0,020		

Cependant, si le taux réel de détection des observateurs est de 30 % (ce qui n'est pas absurde à grande distance) et que le système de détection présente, lui, un taux de détection de 40 % à cette même distance (là encore supérieur de 10 % à l'observateur humain), alors le calcul naïf de la probabilité de détection du système renvoie une estimation de 72,4 % soit une valeur très largement surestimée par rapport à la réalité (Tableau 3).

Tableau 3 - Exemple du biais dans l'estimation de la probabilité de détection (40 %) d'un système de détection basé sur une référence, ici humaine, dont la détection n'est pas de 100 % (30 %) sur la base de 100 trajets réels à proximité d'une éolienne. Le tableau bleu reporte les valeurs réelles de performance des observateurs/systèmes de détection et le tableau vert reporte les estimations obtenues par un calcul naïf de la détection par simple comparaison entre observateurs et système de détection-réaction.

100 trajets		Taux de détection	Nombre de trajets détectés
Observateur		0,3	30
Système		0,4	40
Les deux			12
Détecté par le système mais pas par l'observateur			28
Détecté par l'observateur mais pas par le système			18
Nombre de trajets analysés	58		
Taux de détection du système	0,69		
Biais de détection	0,724		

Ce qui doit être retrouvé dans les protocoles et/ou les résultats des tests :

Si les observateurs humains sont utilisés comme référence, il est nécessaire d'estimer leurs biais (biais de détection, de classification, etc.), et cela en fonction de l'ensemble des variables explicatives qui influencent les performances des systèmes de détection-réaction (distance, visibilité, espèces, etc.) afin d'obtenir des estimations non biaisées des performances de ces systèmes. De plus, il est également indispensable d'identifier les différents observateurs principalement lorsqu'ils changent d'une étude à l'autre ou d'un jour à l'autre et de préciser leurs compétences (formation, habitude aux comptages et suivis des espèces cibles) pour évaluer et modéliser les biais de détection et de classification de chaque observateur. L'utilisation du double comptage avec deux observateurs expérimentés est un bon moyen de réduire les biais humains tout en permettant de les modéliser (méthode du « double observateur »).

3.2. Le fonctionnement

- Ce qu'il faut évaluer :
 - La couverture temporelle : le système est-il actif en tout temps, si non, dans quelles conditions ?
 - La couverture spatiale : le système couvre-t-il l'ensemble de la zone de danger du parc et tous les angles d'arrivée potentiels des oiseaux sur les éoliennes y compris les oiseaux arrivant verticalement, et cela à la distance déterminée pour les espèces cibles (cf. WP3 – MAPE) ?
- Les facteurs d'influence :
 - L'opérationnalité du matériel et des connexions : la fiabilité des composants du système lui-même, mais également, celle de l'alimentation électrique, de la connexion avec le réseau interne du parc et de la connexion vers le réseau internet externe.
 - Le jour et la nuit : l'activation des systèmes de jour ou de nuit dépend de l'écologie des espèces cibles choisies. Attention, cette écologie peut dépendre de leur cycle : en reproduction, en hivernage ou en migration. De nombreuses études montrent en effet que les oiseaux diurnes sont également actifs la nuit, notamment lors de leur migration (Brewster 1886 ; Alerstam 2009 ; García-Jiménez et al. 2020) même si c'est peu le cas pour les grands planeurs qui sont, pour le moment, la cible majoritaire lors de la mise en place des systèmes de détection-réaction.
 - La météo : de nombreuses études montrent que les oiseaux sont actifs et volent en tous types de conditions météorologiques et notamment toutes conditions de vent (Krüger & Garthe 2001). C'est pour cela que les systèmes doivent être actifs dans l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées dans le parc lorsque les éoliennes sont actives. Cette remarque est valable pour le vent (risque de vibration du support du système), les températures extrêmes positives et négatives (risque de surchauffe ou de gel du système) et les intempéries (neige, pluie, brouillard, etc. qui risquent d'occulter les capteurs).
- Piste sur le contenu des évaluations :

Il nous a été reporté plusieurs fois des dysfonctionnements imprévus des systèmes de détection-réaction, soit dans les retours d'expérience des tests de performance, soit lorsque des mortalités ont été constatées sur un parc et qu'un état du système a alors été examiné. Par conséquent, il est

important, et nécessaire, de tester cette « opérationnalité » de fonctionnement des systèmes dans les protocoles de tests de performance.

Un relevé précis des couvertures spatiale et temporelle à l'installation permettrait d'évaluer le fonctionnement du système. De plus, la mise en place de cette vérification en continu par des tests de visibilité du système depuis une image de référence ou des points de contrôle sur le terrain permettrait d'évaluer à chaque instant la stabilité du fonctionnement des systèmes.

3.3. La détection

- Ce qu'il faut évaluer :

Pour cette étape il faut évaluer la probabilité de détection des trajectoires à risque. Afin d'estimer une moyenne et une incertitude de cette probabilité de détection, des réplicats sont nécessaires. De cette probabilité de détection découlent différents paramètres à évaluer (Tableau 4) :

- La possibilité de détecter un nombre important de cibles simultanément (évaluer si la probabilité de détection est constante en fonction de la quantité de cibles).
- Les vrais positifs : c'est la valeur de référence pour mesurer si le système détecte bien les objets présents (probabilité de détection).
- Les faux négatifs (1-probabilité de détection) : ce taux doit être le plus faible possible, car il s'agit de cas où le système ne détecte pas certains objets pourtant présents.
- Les faux positifs : ce taux doit être le plus faible possible pour que le système ne déclenche pas des arrêts malgré l'absence de trajectoire à risque.

Tableau 4 - Matrice de confusion de la détection d'une trajectoire à risque

	Détection	Absence de détection
Présence de cible	Vrai positif	Faux négatif
Absence de cible	Faux positif	Vrai négatif

- Les facteurs d'influence des probabilités de détection et leur évaluation :
 - La distance : une distance de détection minimale doit être définie en fonction de la liste des espèces cibles du parc et de leurs vitesses de vol respectives (cf. WP3 - MAPE, KNE 2019). Cette distance a un impact sur la probabilité de détection avec des performances qui, *a priori*, diminuent plus la distance augmente. Il est donc nécessaire de modéliser cette probabilité de détection en fonction de la distance. Pour cela, si une mesure de cette distance n'est pas réalisée précisément par le système de détection-réaction évalué, il est possible d'utiliser des classes de distance (100 mètres par exemple pour combler l'imprécision des mesures de distance des systèmes optiques 2D).
 - L'altitude : pour certaines espèces cibles, des vols verticaux depuis le dessus de l'éolienne sont possibles. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de prévoir une distance de détection suffisante au-dessus des éoliennes pour ces espèces (cf. WP3-MAPE sur les vitesses des espèces cibles). Les vols verticaux montants sont également possibles pour certaines espèces, c'est pourquoi les systèmes doivent également pouvoir détecter des cibles entre le sol et le rotor de l'éolienne concernée.
 - L'azimut : les oiseaux sont susceptibles d'arriver depuis n'importe quelle direction, le système doit donc avoir des performances équivalentes, quel que soit cet azimut d'arrivée (sur 360 ° à l'horizontale). Par exemple, les caméras utilisées pour couvrir les différents angles doivent avoir les mêmes caractéristiques en tout temps.
 - Les espèces : l'espèce cible joue un rôle majeur dans la détection notamment du fait de sa taille. Des espèces plus grosses (et potentiellement plus lentes aussi) sont en effet généralement détectables de plus loin que les espèces plus petites. Pour évaluer pleinement les performances des systèmes de détection-réaction, il est nécessaire de tester une gamme de taille, des plus grandes espèces cibles aux plus petites possible (box 2).

Box 2 – Comment tester les gammes de taille des espèces cibles potentielles ?

Comme il est parfois difficile de tester l'ensemble des espèces cibles avec une taille d'échantillon suffisante, il est possible d'utiliser d'autres espèces dans des gammes de taille équivalente aux espèces ciblées pour les tests :

- **Les oiseaux de plus de deux mètres d'envergure** : les vautours fauve et moine, le gypaète barbu, l'aigle royal, le pygargue à queue blanche, les 2 cigognes, la grue cendrée, les pélicans, etc.
- **Les oiseaux entre un et deux mètres d'envergure** : le vautour percnoptère, le circaète Jean-le-blanc, l'aigle de Bonelli, l'aigle botté, le balbuzard pêcheur, les 2 milans, la buse variable, la bondrée apivore, l'autour des palombes, les 3 busards, les oies, les cormorans, les grands ardéidés, les flamants, les goélands, etc.
- **Les oiseaux entre 40 centimètres et un mètre d'envergure** : tous les faucons, l'élanion blanc, l'épervier d'Europe, les canards, les colombidés, le rollier d'Europe, etc.

Ces catégories ont été définies sur les performances actuelles des systèmes de détection-réaction, car la détection d'espèces de plus petite taille n'est, à ce jour, pas encore assez performante pour être réalisé dans les parcs éoliens. Dans le futur, avec l'évolution de la technologie, il sera alors intéressant de définir de nouvelles catégories pour ces espèces de plus petite taille.

Notez que des oiseaux captifs de fauconnerie peuvent être utilisés si la taille de l'échantillon « naturel » n'est pas suffisante pour tester les détections.

- **L'arrière-plan** : les contrastes sont les plus marqués sur un fond de ciel uni et d'après les fournisseurs de systèmes optiques. Les objets seraient donc mieux détectés dans ces conditions que sur des fonds de végétation par exemple. Il est donc important d'évaluer les probabilités de détection sur divers arrière-plans. La probabilité de détection peut aussi être influencée si l'arrière-plan est en mouvement

(mer, végétation, nuage, etc.), et ce point doit aussi être évalué dans l'idéal. De même, les signaux radars peuvent être parasités par les signaux renvoyés par le sol et notamment la végétation en mouvement.

- L'heure de la journée, la saison et l'orientation de la trajectoire de l'oiseau par rapport au soleil : les couchers ou levers du soleil créent des zones de forts contrejours dans les systèmes optiques. De même, si une cible arrive droit depuis la direction du soleil, elle sera beaucoup plus difficile à détecter par les systèmes. Il est donc important d'estimer la probabilité de détection à différentes heures de la journée pour avoir des orientations variées par rapport au soleil.
- Les conditions météorologiques : elles influencent principalement la détection par la baisse de visibilité due aux intempéries (brouillard, pluie, neige, grêle, etc.). Notez que ces mauvaises conditions météorologiques représentent une partie non négligeable du temps de fonctionnement de certains parcs éoliens (selon la zone géographique). C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'estimer les performances des systèmes dans l'ensemble des conditions météorologiques rencontrées sur les parcs et pas uniquement lors des conditions idéales (soleil au zénith, beau temps, etc.).

- Piste d'évaluation :

La mise en place d'une grille de performances via le calcul de probabilité de détection dans chaque condition rencontrée (les différents facteurs d'influence listés ci-dessus) dans les parcs éoliens permettrait une évaluation précise et une comparaison possible entre les systèmes afin de choisir le meilleur système selon la configuration et les contraintes spécifiques à chaque parc.

3.4. La classification

La classification s'évalue de la même manière que la détection, et est influencée par les mêmes paramètres. Une évaluation commune sur la détection et la classification est possible, mais uniquement si une classification (identification de la cible) par un observateur humain expérimenté est effectuée.

- Ce qu'il faut évaluer :

Pour cette étape, il faut évaluer la probabilité de classification correcte. Afin d'estimer une moyenne et une incertitude de cette probabilité, des répliqués sont, là aussi, nécessaires. De cette probabilité de bonne classification découlent différents paramètres à évaluer (Tableau 5) :

- La possibilité de bien classer un nombre important de cibles simultanément (équivalente à la capacité maximale de détection d'objets simultanément) : dépendant de l'activité des oiseaux.
- Les vrais positifs (probabilité de bonne classification) : c'est la valeur de référence pour voir si le système classe bien les objets présents.
- Les faux négatifs (1- probabilité de bonne classification) : ce taux doit être le plus faible possible, car il s'agit de situations où le système ne déclenche pas de réaction malgré un risque.
- Les faux positifs : ce taux doit être le plus faible possible pour que le système ne déclenche pas de trop nombreux arrêts ou effarouchements en l'absence de trajectoire à risque.

Tableau 5 - Matrice de confusion de la classification d'une trajectoire à risque

	Bonne classification	Mauvaise classification
Espèce cible	Vrai positif	Faux négatif
Pas espèce cible	Faux positif	Vrai négatif

- Les facteurs d'influence des probabilités de classification :

Les facteurs qui peuvent influencer la classification sont les mêmes que ceux listés pour la détection (cf. 3.3).

- Piste d'évaluation :

Pour estimer la probabilité de bonne classification et évaluer les performances de la classification, de vrais oiseaux doivent être utilisés et seules deux solutions de contrôle existent : soit une vérification par un observateur (en direct ou avec identification sur les photos prises par le système), soit l'utilisation d'une espèce connue pour les tests (c'est le cas lors d'utilisation d'oiseaux de fauconnerie). Notez que certains systèmes « éliminent » en effet les drones ou autres objets volants, car ils ont des silhouettes et des comportements différents des vrais oiseaux. Les probabilités de

bonne classification peuvent être ensuite reportées dans les mêmes grilles de performance que la détection pour permettre une évaluation standard et complète.

3.5. La réaction

- Ce qu'il faut évaluer :
 - La réactivité de système : estimer, par un chronométrage, le temps de réaction du système. Ce temps de réaction est important dans la détermination des zones à risque (voir le WP3 du projet MAPE).
 - Une constance dans la réponse : vérifier qu'il y a toujours une réaction quand le système de détection-réaction la sollicite.
- Les facteurs d'influence :
 - La stabilité de la connexion : une mauvaise connexion au sein du parc et avec le réseau extérieur (de la même manière que pour le « fonctionnement » - cf. 3.1.2), peut engendrer des absences ou des temps de réaction allongés.
 - La prise en compte des demandes d'arrêt du système par les SCADA : le SCADA est géré par chaque turbinier. Il est également utilisé différemment d'un opérateur et d'un parc à l'autre. Il a parfois été constaté des variations du temps de prises en compte des « ordres » envoyés à celui-ci par les systèmes de détection-réaction.
 - L'état de l'éolienne : il a été constaté que certaines éoliennes ne prenaient pas en compte les nouveaux ordres d'arrêts lors du « redémarrage ».
- Piste d'évaluation :

L'ordre de réagir émis par les systèmes de détection-réaction est systématiquement enregistré par ces systèmes avec les vitesses de rotation des rotors correspondantes (d'après les fournisseurs de système de détection-réaction que nous avons consulté). Il est donc possible de vérifier s'il y a bien eu une réaction, le temps de cette réaction pour chacun de ces ordres et l'uniformité de cette réaction entre les machines. Cette vérification peut être régulièrement faite au cours de l'exploitation du parc, car elle n'entraîne pas de manipulation ou réaction supplémentaire du système ou de l'éolienne. Notez que le déclenchement d'effarouchement est indépendant du SCADA, car il n'y a pas d'ordre direct envoyé à l'éolienne. Il est donc important de vérifier également les données des systèmes et pas uniquement celles issues du SCADA. Dans le cas de systèmes n'enregistrant pas le fonctionnement de l'éolienne en parallèle, il convient de réaliser des mesures *in situ*, ce qui est plus complexe.

4. Conclusion

Ce document, rédigé sous forme de « guidelines » avait pour objectif de présenter l'ensemble des tenants et aboutissants de l'utilisation des différentes technologies des systèmes de détection-réaction. Il est destiné à toutes personnes ayant un intérêt dans l'évaluation des systèmes de détection-réaction : personnes rédigeant les protocoles, personnes les appliquant sur le terrain ou personne en charge de la vérification de la qualité des évaluations conduites. L'hétérogénéité des technologies utilisées par les systèmes de détection-réaction et les nombreux facteurs influençant la chaîne de fonctionnement de ces systèmes compliquent l'évaluation de leurs performances. Cependant cette évaluation est nécessaire, non seulement pour vérifier la capacité de réduction des mortalités aviaires, mais également pour obtenir des critères communs pour que les opérateurs puissent choisir le système le plus adapté au besoin de leur parc éolien. Dans le cadre du projet MAPE, nous allons proposer un protocole complet et universel qui permettra d'évaluer l'ensemble des systèmes de détection-réaction et fournir des grilles de performances, mais également d'évaluer le bon fonctionnement des systèmes dans chaque parc.

5. Remerciements

Nous remercions l'ensemble des acteurs ayant participé aux consultations qui ont permis d'aboutir à ce document.

Nous remercions également l'ensemble de l'équipe de recherche (CEFE-CNRS) et d'animation (MSH SUD) du projet MAPE : C. Blary, T. Chambert, S. Dupont, O. Duriez, J. Fluhr & M. Vieira Pak.

6. Bibliographie

- Alerstam, T. (2009). Flight by night or day? Optimal daily timing of bird migration. *Journal of Theoretical Biology*, 258(4), 530-536.
- Arnett, E. B., & May, R. F. (2016). Mitigating wind energy impacts on wildlife: approaches for multiple taxa. *Human–Wildlife Interactions*, 10(1), 5.
- Barré K, Le Viol I, Bas Y, Julliard R, Kerbiriou C (2018) Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation* 226:205–214.

- Barrios L, Rodríguez A (2004) Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines: Bird mortality at wind power plants. *Journal of Applied Ecology* 41:72–81.
- Bellebaum, J, Korner-Nievergelt F, Dürr T, Mammen U (2013). Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *Journal for Nature Conservation* 21:394–400.
- Bernardino J, Bevanger K, Barrientos R, Dwyer JF, Marques AT, Martins RC, Shaw JM, Silva JP, Moreira F (2018) Bird collisions with power lines_ State of the art and priority areas for research. *Biological Conservation* 222:1–13.
- Brewster, W. 1886. Bird migration. *Memoirs Nuttall Ornithological Club* 1, Nuttall 498 Ornithological Club, Cambridge, Massachusetts
- Carrete M, Sánchez-Zapata JA, Benítez JR, Lobón M, Donázar JA (2009) Large scale risk-assessment of wind-farms on population viability of a globally endangered long-lived raptor. *Biological Conservation*:8.
- Diehl, R. H., Larkin, R. P., & Black, J. E. (2003). Radar observations of bird migration over the Great Lakes. *The Auk*, 120(2), 278-290.
- Dominguez del Valle J, Cervantes Peralta F, Jaquero Arjona MI (2020) Factors affecting carcass detection at wind farms using dogs and human searchers. *Journal of Applied Ecology* 57:1926–1935.
- Drewitt AL, Langston RHW (2006) Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148:29-42.
- Drewitt AL, Langston RHW (2008) Collision Effects of Wind-power Generators and Other Obstacles on Birds. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134:233–266.
- Frick WF (2017) Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*:6.
- García-Jiménez R, Martínez-González JM, Oliva-Vidal P, Piqué J, Sesé JA, Margalida A (2020) Nocturnal flights by Bearded Vultures -*Gypaetus barbatus*- detected for the first-time using GPS and accelerometer data. *Bird Study* 67:135–141.
- Global Wind Energy, Council (2021). Gwec - Global wind report 2021.
- Harmata A.R, Podruzny K.M, Zelenak J.R, Morrison M.L. (1999). Using marine surveillance radar to study bird movements and impact assessment. *Wildl. Soc. Bull.* 27:44–52
- Katzner, Nelson, Diffendorfer JE, Duerr AE, Campbell CJ, Leslie D, Vander Zanden HB, Yee JL, Sur M, Huso M, Braham MA, Morrison ML, Loss SR, Poessel SA, Conkling TJ, Miller T (2019) Wind energy: An ecological challenge. *Science* 366:1206–1207.

- Kleyheeg-Hartman JC, Krijgsveld KL, Collier MP, Poot MJM, Boon AR, Troost TA, Dirksen S (2018) Predicting bird collisions with wind turbines_ Comparison of the new empirical Flux Collision Model with the SOSS Band model. *Ecological Modelling* 387:144–153.
- KNE (2019) Anforderungsprofil, "Anforderungen an eine fachlich valide Erprobung von technischen Systemen zur bedarfsgerechten Betriebsregulierung von Windenergieanlagen".
- Krüger, T., & Garthe, S. (2001). Flight altitudes of coastal birds in relation to wind direction and speed. *Atlantic Seabirds*, 3(4), 203-216.
- Larkin, R. P., Griffin, D. R., Torre-Bueno, J. R., & Teal, J. (1979). Radar observations of bird migration over the western North Atlantic Ocean. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 4(3), 225-264.
- Loss SR (2013) Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation*:9.
- LPO (2017) Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune.
- Marques AT, Santos CD, Hanssen F, Muñoz A, Onrubia A, Wikelski M, Moreira F, Palmeirim JM, Silva JP (2020) Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. *J Anim Ecol* 89:93–103.
- McClure CJW, Martison L, Allison TD (2018) Automated monitoring for birds in flight_ Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation*:9.
- McClure CJW, Rolek BW, Dunn L, McCabe JD, Martinson L, Katzner T (2021) Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology* 58:446–452.
- Péron G, Hines JE, Nichols JD, Kendall WL, Peters KA, Mizrahi DS (2013) Estimation of bird and bat mortality at wind-power farms with superpopulation models. *J Appl Ecol* 50:902–911.
- Powlesland, R. G. (2009). Impacts of wind farms on birds: a review. *Science for conservation*, (289).
- Richardson, S. M., Lintott, P. R., Hosken, D. J., Economou, T., & Mathews, F. (2021). Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats. *Scientific Reports*, 11(1), 1-6.
- Rollins, K. E., Meyerholz, D. K., Johnson, G. D., Capparella, A. P., & Loew, S. S. (2012). A forensic investigation into the etiology of bat mortality at a wind farm: barotrauma or traumatic injury?. *Veterinary pathology*, 49(2), 362-371.
- Román, P. R., Salinas, C. O., & Araújo, B. M. (2020). Assessing the effect of wind farms in fauna with a mathematical model. *Scientific Reports*, 10(1), 1-1.

- Schaub, M (2012). Spatial distribution of wind turbines is crucial for the survival of red kite populations. *Biological Conservation* 155:111–118.
- Smith, E. P., Orvos, D. R., & Cairns Jr, J. (1993). Impact assessment using the before-after-control-impact (BACI) model: concerns and comments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(3), 627-637.
- Thaxter, C. B., Buchanan, G. M., Carr, J., Butchart, S. H., Newbold, T., Green, R. E., ... & Pearce-Higgins, J. W. (2017). Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1862), 20170829.
- Velilla E, Collinson E, Bellato L, Berg MP, Halfwerk W (2021) Vibrational noise from wind energy-turbines negatively impacts earthworm abundance. *Oikos:oik.08166*.
- Zwart MC, Dunn JC, McGowan PJK, Whittingham MJ (2016) Wind farm noise suppresses territorial defense behavior in a songbird. *BEHECO* 27:101–108.